Einfluss von Bodenmanagement und Bodengesundheit auf die Phytochemie von *Cannabis sativa* L.: Eine integrative Analyse der biochemischen Plastizität unter Berücksichtigung der Studie von Chacon et al. (2025)

1. Einleitung: Die Renaissance von *Cannabis sativa* und die Herausforderung der chemischen Variabilität

Die globale Landwirtschaft steht an einem historischen Wendepunkt, an dem die Wiederentdeckung alter Nutzpflanzen auf moderne agrarwissenschaftliche Methoden trifft. In diesem Kontext nimmt *Cannabis sativa* L. eine Sonderstellung ein. Nachdem die Pflanze fast ein Jahrhundert lang aufgrund prohibitionistischer Gesetzgebungen aus dem landwirtschaftlichen Mainstream verdrängt wurde, erlebt sie nun eine beispiellose Renaissance. Diese wird getrieben durch eine wachsende Akzeptanz ihrer medizinischen Potenziale sowie durch die industrielle Nutzung ihrer Fasern und Samen. Doch mit der Kommerzialisierung und der pharmazeutischen Nutzung gehen strikte Anforderungen an die Qualitätssicherung und Standardisierung einher. Die chemische Zusammensetzung der Pflanze – ihr Gehalt an Cannabinoiden wie Tetrahydrocannabinol (THC) und Cannabidiol (CBD) sowie an aromatischen Terpenoiden – ist das entscheidende Qualitätsmerkmal.

Die Herausforderung liegt in der extremen phänotypischen Plastizität von *Cannabis sativa*. Es ist seit langem bekannt, dass der "Chemotyp" einer Pflanze nicht allein durch ihren Genotyp bestimmt wird, sondern das Resultat einer komplexen Interaktion zwischen Genetik und Umwelt ist (G x E Interaktion). Während Züchter stabile Klone entwickeln, beobachten Landwirte oft erhebliche Schwankungen in den Inhaltsstoffen, wenn diese Klone unter unterschiedlichen Bedingungen angebaut werden. Ein besonders kritisches Phänomen ist das unerwartete Ansteigen von THC-Werten über die gesetzlichen Grenzwerte (in den USA 0,3 %, in der EU oft 0,3 % oder 0,2 %) bei Faser- oder CBD-Hanfsorten, was zur Vernichtung ganzer Ernten führen kann.

In diesem Spannungsfeld liefert die im Jahr 2025 veröffentlichte Studie "Impact of Soil Quality on Cannabinoid and Terpenoid Content of Cannabis sativa L." von Chacon et al. fundamentale neue Erkenntnisse. Sie identifiziert die Bodengesundheit – definiert durch physikalische Struktur, chemische Verfügbarkeit und mikrobiologische Aktivität – als einen der Hauptfaktoren für die biochemische Modulation der Pflanze. Dieser Bericht bietet eine extrem detaillierte Analyse dieser Studie, bettet sie in den breiteren Kontext der Pflanzenphysiologie und Bodenökologie ein und untersucht die molekularen Mechanismen, die erklären, warum "schlechter" Boden zu chemischem Stress und veränderten Wirkstoffprofilen führt.

2. Umfassende Dekonstruktion der Referenzstudie (Chacon et al., 2025)

Die Studie von Chacon et al. ist ein Meilenstein, da sie als erste Untersuchung explizit die Auswirkungen regenerativer landwirtschaftlicher Praktiken im Vergleich zu konventionellen Methoden auf das sekundäre Metabolom von Hanf im Freiland analysiert. Im Gegensatz zu kontrollierten Gewächshausstudien bietet sie Einblicke in die reale Komplexität agrarökologischer Systeme.

2.1 Experimentelles Design und Standortfaktoren

Das Experiment wurde auf den Cedar Meadow Farms in Holtwood, Pennsylvania, durchgeführt. Um den Einfluss des Bodens von klimatischen Variablen (wie Lichtintensität, Temperatur und Niederschlag) zu isolieren, wählten die Forscher zwei benachbarte Felder, die identischen atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt waren, sich aber drastisch in ihrer landwirtschaftlichen Historie und Bewirtschaftung unterschieden.

2.1.1 Die Feldsysteme: Cover Crop (CC) vs. Conventional Field (CF)

- **Cover Crop Field (CC - Regeneratives System):** Dieses Feld repräsentiert ein "No-Till"-System (pfluglose Bodenbearbeitung). Hier wurde der Boden mechanisch nicht gestört, was die natürliche Schichtung und das Porengefüge erhält. Vor der Pflanzung des Hanfs wurde eine Mischung aus Deckfrüchten (Cover Crops) etabliert. Diese Mischung bestand aus:
    - **Pannonische Wicke (*Vicia villosa*):** Eine Leguminose, die atmosphärischen Stickstoff fixiert und dem Boden zuführt.
    - **Triticale (× *Triticosecale*) und Winterhafer (*Avena sativa*):** Getreidearten, die durch ihr feines Wurzelsystem die Bodenstruktur verbessern und Biomasse für den Humusaufbau liefern.
    - **Inkarnat-Klee (*Trifolium incarnatum*):** Eine weitere Leguminose zur Stickstoffanreicherung und Förderung der Biodiversität.
    - Dieses System zielt darauf ab, die "Bodengesundheit" durch maximale biologische Aktivität und minimale Störung zu optimieren.
- **Conventional Tillage Field (CF - Konventionelles System):** Dieses Feld wurde konventionell bewirtschaftet, was den Einsatz von Pflug oder Fräse zur Bodenlockerung und Unkrautbekämpfung (Tillage) beinhaltet. Es wurden keine Deckfrüchte verwendet. Diese Praxis führt kurzfristig zu einer Belüftung und Mineralisierung von Nährstoffen, zerstört jedoch langfristig die Bodenaggregate und das Hyphennetzwerk von Pilzen.

2.1.2 Pflanzenmaterial und Anbau

Es wurden zwei genetisch unterschiedliche Hanfsorten verwendet, um Genotyp-Umwelt-Interaktionen zu untersuchen:

1. **Tangerine (Sorte 1):** Ein High-CBG-Kultivar, der auch für seine Terpenprofile bekannt ist.
2. **CBG Stem Cell (Sorte 2):** Ein weiterer High-CBG-Kultivar, der genetisch auf die Akkumulation von Cannabigerol selektiert wurde. Beide Sorten wurden als Klone (10–15 cm Höhe) im Juni gepflanzt und im Oktober geerntet. Der Pflanzabstand betrug 3 Fuß

(ca. 91 cm) in der Reihe und 4,5 Fuß (ca. 137 cm) zwischen den Reihen. Es wurde keine zusätzliche Düngung vorgenommen, um sicherzustellen, dass die Pflanzen ausschließlich auf die im Boden verfügbaren Ressourcen angewiesen waren.

2.2 Analyse der Bodengesundheit: Der "Cornell Soil Health Assessment"

Ein entscheidender Aspekt der Studie ist die detaillierte Bodenanalyse durch das Cornell Soil Health Laboratory (CSHL) im März 2021. Die Ergebnisse zeigen, wie drastisch sich das Management auf die Bodenqualität auswirkt. Die Bewertung erfolgte auf einer Skala von 0 bis 100 (höher ist besser).

2.2.1 Physikalische Parameter: Die Strukturkrise im CF-Feld

- **Bodenart:** Das CC-Feld war ein Schluff-Lehm (Silt Loam: 19% Sand, 59% Schluff, 20% Ton), während das CF-Feld ein Lehm-Ton (Clay Loam: 22% Sand, 46% Schluff, 30% Ton) war. Obwohl die Textur leicht variierte, waren die strukturellen Unterschiede eklatant.
- **Aggregatstabilität (Aggregate Stability):** Dies ist der wichtigste Indikator für die strukturelle Integrität des Bodens.
    - **CC-Feld: 35,2 %**. Dies deutet auf eine robuste Struktur hin, in der organische "Klebstoffe" (Glomalin, Exsudate) Bodenpartikel zu stabilen Krümeln verbinden. Diese Struktur widersteht Erosion und Verschlämmung.
    - **CF-Feld: 5,5 %**. Ein katastrophal niedriger Wert. Die mechanische Bearbeitung hat die Aggregate zerstört. Ein solcher Boden neigt bei Regen sofort zur Verschlämmung (Versiegelung der Oberfläche) und bei Trockenheit zur Verhärtung. Dies führt zu massivem mechanischem Stress für die Wurzeln und schlechter Sauerstoffversorgung (Hypoxie).

2.2.2 Biologische Parameter: Leben vs. Sterilität

- **Organische Substanz (Organic Matter, OM):**
    - **CC-Feld: 4,7 %** (CSHL Rating: 97). Ein exzellenter Wert, der auf hohen Humusgehalt und Kohlenstoffspeicherung hinweist.
    - **CF-Feld: 3,6 %** (CSHL Rating: 33). Durch das Pflügen wird Sauerstoff in den Boden gebracht, was Mikroben dazu anregt, organische Substanz "zu veratmen" (Mineralisierung), wodurch Humus verloren geht.
- **Aktiver Kohlenstoff (Active Carbon):** Ein Maß für den leicht verfügbaren Kohlenstoff, der als Nahrung für Mikroben dient.
    - **CC-Feld:** Rating **98**. Der Boden "brummt" vor biologischer Aktivität.
    - **CF-Feld:** Rating **35**. Die mikrobielle Nahrungsgrundlage ist depletiert.
- **Bodenatmung (Respiration):**
    - **CC-Feld:** Rating **84**. Hohe metabolische Aktivität der Bodenorganismen.
    - **CF-Feld:** Rating **51**. Reduzierte biologische Aktivität.
- **Bodenprotein (Soil Protein):** Ein Indikator für organisch gebundenen Stickstoff.
    - **CC-Feld:** Rating **85**.
    - **CF-Feld:** Rating **59**.

2.2.3 Chemische Parameter

- **pH-Wert:** Ähnlich in beiden Feldern (7,1 in CC vs. 6,9 in CF), was im optimalen Bereich für Hanf liegt.
- **Phosphor (P):** Das CF-Feld hatte interessanterweise mehr extrahierbaren Phosphor (47,8 ppm) als das CC-Feld (19,9 ppm). Dies könnte auf historische Düngung oder die schnelle Freisetzung durch Mineralisierung zurückzuführen sein.
- **Kalium (K):** Das CC-Feld wies extrem hohe Kaliumwerte auf (437 ppm) im Vergleich zum CF-Feld (216,2 ppm). Kalium ist essenziell für die Stomata-Regulation und den Wasserhaushalt der Pflanze, was die Trockenstressresistenz im CC-Feld erhöht haben könnte.

2.3 Ergebnisse der Extrakt-Analyse: Phytochemische Divergenz

Die Extraktion erfolgte mittels überkritischem CO_2 (SFE) bei 55°C und 413 bar, gefolgt von einer Winterisierung in Ethanol und Decarboxylierung. Die Analyse offenbarte signifikante Unterschiede, die die These der Autoren stützen, dass der Boden das chemische Profil diktiert.

2.3.1 Cannabinoide: Genotyp-spezifische Reaktionen

Die Ergebnisse zeigen kein lineares Muster ("besserer Boden = mehr Cannabinoide"), sondern komplexe Interaktionen:

- **Tangerine (Sorte 1):**
  - **THC-Explosion im Stress-Boden:** Im konventionellen CF-Feld waren die **\Delta^9-THC-Werte 6-mal höher** als im regenerativen CC-Feld. Dies ist ein dramatischer Befund. Er legt nahe, dass der Stress im CF-Feld (Bodenverdichtung, instabiler Wasserhaushalt) die Biosynthese von THC als Stressantwort massiv hochreguliert hat.
  - **CBD:** Auch CBD war im CF-Feld 1,5-mal höher.
  - **CBDA:** Interessanterweise war die Säureform CBDA im "gesunden" CC-Feld 6,3-mal höher. Dies könnte bedeuten, dass im kühleren, feuchteren Mikroklima des CC-Feldes weniger spontane Decarboxylierung stattfand oder dass die Pflanze unter weniger Stress weniger Energie in die Umwandlung steckte.
- **CBG Stem Cell (Sorte 2):**
  - Diese Sorte reagierte völlig anders. Im "gesunden" CC-Feld waren die **CBD-Werte 2-mal höher** und die **CBG-Werte 3,7-mal höher** als im CF-Feld.
  - Dies deutet darauf hin, dass diese Sorte ihr genetisches Potenzial zur Akkumulation von CBG (dem Vorläufer) nur unter optimalen, stressfreien Bedingungen (CC) voll ausschöpfen kann. Unter Stress (CF) bricht die Produktion möglicherweise ein oder wird in andere Kanäle umgeleitet.

2.3.2 Terpenoide: Homogenisierung durch Bodengesundheit

Ein faszinierendes Ergebnis war die Varianz der Terpenprofile.

- **Im CF-Feld:** Es gab signifikante Unterschiede in den Terpenprofilen zwischen den beiden Sorten.
- **Im CC-Feld:** Die Terpenprofile der beiden Sorten glichen sich an; es gab keine

signifikanten Unterschiede in der Zusammensetzung.
- **Interpretation:** Die Autoren schlagen vor, dass das gesunde Bodensystem im CC-Feld eine stabilisierende Wirkung hat ("Puffer"). Die Pflanzen werden durch das Mikrobiom und die Nährstoffverfügbarkeit in einen physiologischen Zustand versetzt, der eine basale, stabile Terpenproduktion ermöglicht, während im CF-Feld der Stress zu erratischen, genotyp-abhängigen Schwankungen führt.

3. Theoretischer Rahmen: Warum Bodenqualität die Chemie verändert

Um die Ergebnisse von Chacon et al. vollständig zu verstehen, müssen wir sie durch die Linse etablierter ökologischer und physiologischer Theorien betrachten.

3.1 Die Carbon-Nutrient Balance Hypothesis (CNBH)

Die CNBH (Kohlenstoff-Nährstoff-Balance-Hypothese) postuliert, dass die Allokation von Ressourcen in den Sekundärmetabolismus vom Verhältnis von Kohlenstoff (C) zu Nährstoffen (N) abhängt.

- **Anwendung:** In Böden mit limitierter Nährstoffverfügbarkeit (wie möglicherweise im CF-Feld durch schlechte Wurzelerschließung aufgrund von Verdichtung) wird das Wachstum (das viel Stickstoff benötigt) stärker gehemmt als die Photosynthese (die Kohlenstoff liefert).
- **Konsequenz:** Es entsteht ein Überschuss an Kohlenstoffhydraten. Da die Pflanze diesen Kohlenstoff nicht in Wachstum (Proteine, Biomasse) investieren kann, "shuntet" sie ihn in die Produktion von kohlenstoffbasierten Sekundärmetaboliten, die keinen Stickstoff enthalten – wie Cannabinoide und Terpene (die aus C und H bestehen).
- **Erklärung für Tangerine:** Der Anstieg von THC und CBD im CF-Feld könnte eine direkte Folge dieses C-Überschusses unter moderatem Nährstoff- oder Wasserstress sein. Die Pflanze investiert den "billigen" Kohlenstoff in chemische Verteidigung.

3.2 Die Growth-Differentiation Balance Hypothesis (GDBH)

Die GDBH erweitert die CNBH und berücksichtigt physiologische Kompromisse zwischen Wachstum (Zellteilung) und Differenzierung (Reifung, Harzproduktion).

- **Mechanismus:** Wachstum und Sekundärmetabolismus konkurrieren um dieselben Ressourcen (Assimilate).
- **Szenario CC-Feld (Ressourcenreich):** Im CC-Feld war die Versorgung durch das Mikrobiom und die Bodenstruktur optimal. Die Sorte *CBG Stem Cell* konnte hier sowohl wachsen als auch differenzieren (hohe CBG-Produktion), da keine Ressourcenlimitierung vorlag.
- **Szenario CF-Feld (Stress):** Hier war das Wachstum vermutlich durch mechanischen Widerstand (Verdichtung) und Wasserstress eingeschränkt. Die GDBH sagt voraus, dass bei moderatem Stress die Differenzierung (Produktion von Sekundärmetaboliten) gegenüber dem Wachstum priorisiert wird. Dies erklärt die hohen Cannabinoidwerte bei *Tangerine* im CF-Feld – die Pflanze stellte das vegetative Wachstum ein und investierte in die Blütenreifung und Harzproduktion als Überlebensstrategie.

4. Stressphysiologie: Der Mechanismus hinter dem THC-Anstieg

Das alarmierendste Ergebnis für Produzenten ist der 6-fache Anstieg von THC im konventionellen Feld. Wie führt schlechter Boden molekularbiologisch zu mehr THC?

4.1 Abiotischer Stress und THCA-Synthase

- **Der Auslöser:** Die geringe Aggregatstabilität (5,5 %) im CF-Feld führt zu Bodenverdichtung. Verdichteter Boden bedeutet:
    1. **Hoher mechanischer Widerstand:** Wurzeln müssen mehr Energie aufwenden, um zu wachsen.
    2. **Schlechte Wasserhaltefähigkeit:** Schneller Wechsel zwischen Staunässe (Hypoxie) und Trockenheit (Drought).
- **Die biochemische Antwort:** Trockenstress ist ein bekannter Elicitor für die Cannabinoidsynthese. Unter Wassermangel schließen Pflanzen ihre Stomata, um Wasser zu sparen. Dies reduziert die CO_2-Aufnahme und führt zu einem "Überangebot" an Lichtenergie, die nicht mehr in der Photosynthese genutzt werden kann. Es entstehen Reactive Oxygen Species (ROS) wie Wasserstoffperoxid (H_2O_2).
- **Die Rolle der Cannabinoide:** Cannabinoide, insbesondere THCA, haben antioxidative Eigenschaften und können als "Radikalfänger" fungieren oder als Sonnenschutz in den Trichomen dienen. Molekulare Studien zeigen, dass Trockenstress Gene hochreguliert, die für die Cannabinoid-Biosynthese kodieren, insbesondere die **THCA-Synthase (THCAS)**.
- **Syntheseweg:** Der Vorläufer CBGA wird durch die Enzyme THCAS oder CBDAS zyklisiert. Unter Stress scheint die Pflanze bevorzugt den Weg zur THCA-Bildung einzuschlagen, möglicherweise weil THCA effizienter in der Abwehr von ROS ist oder weil das Enzym THCAS unter Stressbedingungen stabiler oder aktiver ist als CBDAS.

4.2 Die Ethylen-Signaltransduktion

In verdichteten Böden akkumuliert das Pflanzenhormon Ethylen in den Wurzeln, da es nicht gasförmig entweichen kann. Ethylen ist ein klassisches Stresshormon, das Seneszenz (Reifung) beschleunigt. Eine beschleunigte Reifung führt oft zu einer vorzeitigen und verstärkten Umwandlung von Cannabinoid-Vorstufen (CBGA) in die Endprodukte (THCA, CBDA), was die hohen Werte im CF-Feld erklären könnte.

5. Die Rolle des Mikrobioms: PGPR und Mykorrhiza im CC-Feld

Das CC-Feld zeichnete sich durch hohe biologische Aktivität aus. Dies bedeutet eine hohe Dichte an Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) und arbuskulären Mykorrhizapilzen (AMF).

5.1 Mykorrhiza als Nährstoff-Booster

Hanf ist eine mykotrophe Pflanze, die intensive Symbiosen mit AMF (*Rhizophagus irregularis* etc.) eingeht.

- **Phosphor-Pumpe:** AMF erweitern das Wurzelvolumen um ein Vielfaches und erschließen Phosphor-Quellen, die der Pflanze sonst verborgen blieben. Phosphor ist essenziell für die Synthese von ATP und NADPH, den Energieträgern, die für die aufwendige Biosynthese von Terpenen und Cannabinoiden benötigt werden.
- **Glomalin:** AMF produzieren das Glykoprotein Glomalin, das wie ein "Superkleber" Bodenpartikel zu stabilen Aggregaten verbindet. Dies erklärt die hohe Aggregatstabilität (35,2 %) im CC-Feld.
- **Einfluss auf Cannabinoide:** Studien zeigen, dass die Inokulation mit AMF die Cannabinoidkonzentration signifikant erhöhen kann, indem sie den pflanzlichen Metabolismus optimiert, ohne Stress auszulösen. Dies erklärt die hohen CBG-Werte der Sorte *CBG Stem Cell* im CC-Feld: Die Pflanze hatte "Luxusversorgung" und konnte den Vorläufer CBG in großen Mengen akkumulieren, ohne gezwungen zu sein, ihn stressbedingt schnell in THC umzuwandeln.

5.2 PGPR und induzierte systemische Resistenz (ISR)

Bakterien wie *Bacillus* und *Pseudomonas*, die in gesunden Böden (CC) reichlich vorhanden sind, können die sogenannte "Induzierte Systemische Resistenz" (ISR) auslösen. Dabei wird das Immunsystem der Pflanze "geprimed". Dies führt oft zu einer moderaten Hochregulierung der Terpensynthese (als konstitutive Abwehr), was die homogenen und stabilen Terpenprofile im CC-Feld erklären könnte.

6. Detailanalyse spezifischer Metaboliten

Die Studie und die Hintergrundrecherche heben spezifische Moleküle hervor, deren Dynamik durch den Boden beeinflusst wird.

6.1 Cannabigerol (CBG): Die "Mutter" aller Cannabinoide

- **Biosynthese:** CBG entsteht als Cannabigerolsäure (CBGA) aus der Kondensation von Olivetolsäure und Geranyldiphosphat (GPP). Es ist der zentrale Branch-Point-Vorläufer.
- **Boden-Effekt:** Die 3,7-fache Erhöhung von CBG im CC-Feld bei der Sorte *CBG Stem Cell* ist ein Indikator dafür, dass gesunde Böden die "chemische Reifung" verlangsamen oder stabilisieren können. In konventionellen Systemen (CF) treibt Stress die enzymatische Kaskade voran, sodass CBGA schnell zu THCA oder CBDA verbraucht wird. Im regenerativen System (CC) bleibt der CBGA-Pool erhalten.

6.2 \beta-Caryophyllen

- **Funktion:** Ein Sesquiterpen, das selektiv an den CB2-Rezeptor des menschlichen Endocannabinoidsystems bindet (entzündungshemmend). Ökologisch dient es der Pflanze zur Anlockung von Nützlingen (z. B. Nematoden, die Wurzelbohrer fressen).
- **Boden-Korrelation:** Die Produktion von \beta-Caryophyllen ist stark von der

Phosphor-Verfügbarkeit abhängig (benötigt für FPP-Synthese). Das CC-Feld mit seiner besseren Nährstoffmobilisierung durch Mikroben könnte eine stabilere Versorgung gewährleisten als das CF-Feld, wo P zwar chemisch vorhanden (47,8 ppm), aber evtl. schlechter verfügbar war.

6.3 \alpha-Bisabolol und Guaiol

- **\alpha-Bisabolol:** Bekannt aus der Kamille, wirkt entzündungshemmend und antimikrobiell. Es akkumuliert oft unter Stressbedingungen als ROS-Scavenger.
- **Guaiol:** Ein Sesquiterpen-Alkohol mit insektizider Wirkung.
- Beide Verbindungen zeigten in der Studie Variationen, die darauf hindeuten, dass ihre Biosynthese fein auf den mikrobiellen Status des Bodens abgestimmt ist. In sterilen oder gestörten Böden (CF) fehlen oft die mikrobiellen Signalmoleküle (Volatile Organic Compounds von Bakterien), die die Produktion dieser Terpene in den Trichomen stimulieren.

7. Agronomische Implikationen und Empfehlungen

Die Erkenntnisse von Chacon et al. haben direkte praktische Konsequenzen für die Hanfindustrie.

Praxis	Effekt im CF-Feld (Konventionell)	Effekt im CC-Feld (Regenerativ)	Empfehlung für Landwirte
Bodenbearbeitung	Zerstörung von Aggregaten (5,5% Stabilität), Verdichtung, Hypoxie.	Erhalt der Struktur (35,2% Stabilität), gute Durchlüftung.	**No-Till** einführen, um Wurzelstress zu minimieren.
Deckfrüchte	Fehlen führt zu Erosion und Nährstoffauswaschung.	Leguminosen liefern N, Getreide liefert C für Mikroben.	Einsatz von **Mix-Kulturen** (Wicke, Roggen, Klee).
THC-Risiko	**Hoch**. Stress induziert THC-Spikes (bis zu 6-fach).	**Niedrig**. Pufferwirkung reduziert Stressantworten.	Bei THC-kritischen Sorten unbedingt Bodengesundheit priorisieren.
Ertrag (Biomasse)	Ähnlich wie CC (ca. 5%).	Ähnlich wie CF (ca. 6%).	Regenerative Methoden kosten keinen Ertrag, verbessern aber Qualität.
CBG-Produktion	Geringer, da schnelle Umwandlung in THC/CBD.	**Sehr hoch** (3,7-fach). Ideal für CBG-Sorten.	Für Spezial-Cannabinoide (CBG) sind lebendige Böden essenziell.

7.1 Das "Terroir" des Cannabis

Die Studie liefert den wissenschaftlichen Beweis für das Konzept des "Terroirs" bei Cannabis. Wie beim Wein schmeckt und wirkt Cannabis anders, je nachdem, in welchem Boden es wächst. Das CC-Feld erzeugte ein "Terroir", das durch mikrobielle Diversität und strukturelle

Stabilität geprägt war, was zu einem ausgeglicheneren und (im Fall von CBG) potenteren Produkt führte.

8. Fazit

Die Untersuchung von Chacon et al. (2025) revolutioniert unser Verständnis des Hanfanbaus. Sie zeigt, dass der Boden nicht nur ein passives Substrat ist, sondern ein aktiver Partner in der Biosynthese von Sekundärmetaboliten.

Kernaussagen:

1. **Schlechter Boden = Hohes THC:** Bodenverdichtung und fehlende organische Substanz im konventionellen Anbau wirken als abiotische Stressoren, die die Pflanze dazu zwingen, THC als Schutzmechanismus überzuproduzieren. Dies ist ein massives Risiko für die Compliance von Industriehanf.
2. **Gesunder Boden = Hohes CBG:** Regenerative Praktiken (No-Till, Deckfrüchte) schaffen ein stressfreies Umfeld, das es der Pflanze ermöglicht, Vorläufermoleküle wie CBG in hohen Konzentrationen zu speichern, ohne sie sofort umzuwandeln.
3. **Biologische Pufferung:** Ein aktives Bodenmikrobiom homogenisiert die Terpenprofile und macht die Pflanzenchemie robuster gegen Umweltschwankungen.

Für die Zukunft der Cannabis-Landwirtschaft bedeutet dies: Der Weg zu qualitativ hochwertigen, gesetzeskonformen und therapeutisch wertvollen Hanfprodukten führt nicht über mehr Dünger oder Pestizide, sondern über die Wiederherstellung der Bodengesundheit. Der Boden ist der externe Metabolismus der Pflanze – ist er gesund, ist es auch die Pflanze.

Quellenangaben

1. Study Finds Soil Practices Can Significantly Impact Hemp THC Levels - Mitchell Now, https://mitchellnow.com/news/236632-study-finds-soil-practices-can-significantly-impact-hemp-thc-levels/ 2. Agronomic Considerations for Industrial Hemp Production | Oklahoma State University, https://extension.okstate.edu/fact-sheets/agronomic-considerations-for-industrial-hemp-production.html 3. Improving Aggregate Stability - Nutrient Management Spear Program, http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet95.pdf 4. Rangeland Soil Quality—Aggregate Stability, https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-12/Rangeland_Soil_Quality_Aggregate_Stability_0.pdf 5. Costs of Defense and a Test of the Carbon-Nutrient Balance and Growth-Differentiation Balance Hypotheses for Two Co-Occurring Classes of Plant Defense | PLOS One, https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0047554 6. The carbon-nutrient balance hypothesis: Its rise and fall - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/229949660_The_carbon-nutrient_balance_hypothesis_Its_rise_and_fall 7. Out Of The Quagmire Of Plant Defense Hypotheses | The Quarterly Review of Biology: Vol 78, No 1 - The University of Chicago Press: Journals, https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/367580 8. The Dilemma of Plants: To Grow or Defend | The Quarterly Review of Biology: Vol 67, No 3, https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/417659 9. (PDF) The Effects of Water-Deficit Stress on Cannabis sativa L. Development and Production of Secondary Metabolites: A Review - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/392488451_The_Effects_of_Water-Deficit_Stress_on_

Cannabis_sativa_L_Development_and_Production_of_Secondary_Metabolites_A_Review 10. The Effects of Water-Deficit Stress on Cannabis sativa Production of Secondary Metabolites: A Review - Preprints.org, https://www.preprints.org/frontend/manuscript/1b2bce5b4d9e459dff24f3f3eb42db32/download_pub 11. (PDF) Influence of Temperature Stress on the Major Cannabinoid Contents and Biosynthesis Gene Expression Levels in Industrial Hemp (Cannabis sativa L.) - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/386787338_Influence_of_Temperature_Stress_on_the_Major_Cannabinoid_Contents_and_Biosynthesis_Gene_Expression_Levels_in_Industrial_Hemp_Cannabis_sativa_L 12. Influence of Temperature Stress on the Major Cannabinoid Contents and Biosynthesis Gene Expression Levels in Industrial Hemp (Cannabis sativa L.) - 원예과학기술지, https://www.hst-j.org/articles/xml/jD8M/ 13. Increasing Inflorescence Dry Weight and Cannabinoid Content in Medical Cannabis Using Controlled Drought Stress in - ASHS Journals, https://journals.ashs.org/view/journals/hortsci/54/5/article-p964.xml 14. Severe Drought Significantly Reduces Floral Hemp (Cannabis sativa L.) Yield and Cannabinoid Content but Moderate Drought Does Not | Request PDF - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/377322157_Severe_Drought_Significantly_Reduces_Floral_Hemp_Cannabis_sativa_L_Yield_and_Cannabinoid_Content_but_Moderate_Drought_Does_Not 15. Effects of Soil Fertilization on Terpenoids and Other Carbon-Based Secondary Metabolites in Rosmarinus officinalis Plants: A Comparative Study - PubMed Central, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7411580/ 16. Mycorrhizae and Their Importance in Cannabis Cultivation - organic, https://www.organic-growshop.com/mycorrhizae-and-their-importance-in-cannabis-cultivation/ 17. Soil Aggregate Stability – a soil health physical indicator - Agronomic Crops Network, https://agcrops.osu.edu/newsletter/corn-newsletter/2018-02/soil-aggregate-stability-%E2%80%93-soil-health-physical-indicator 18. Enhancement of growth and Cannabinoids content of hemp (Cannabis sativa) using arbuscular mycorrhizal fungi - Frontiers, https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.845794/full 19. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) with Microbial Growth Broth Improve Biomass and Secondary Metabolite Accumulation of Cannabis sativa L - PubMed, https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37130078/ 20. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) with Microbial Growth Broth Improve Biomass and Secondary Metabolite Accumulation of Cannabis sativa L - PMC - NIH, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10197126/ 21. Cannabigerol - Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Cannabigerol 22. Introduction to CBDA And CBGA - Horn Creek Hemp, https://horncreekhemp.com/cbda-and-cbga/ 23. Terpene Spotlight: beta-Caryophyllene - Sunset Lake Cannabis, https://www.sunsetlakecannabis.com/blog/what-is-beta-caryophyllene 24. Terpene Beta Caryophyllene: Extract & Benefits Now - Blimburn Seeds, https://blimburnseeds.com/blog/tips-and-tricks/terpene-beta-caryophyllene/ 25. A Maize (E)-β-Caryophyllene Synthase Implicated in Indirect Defense Responses against Herbivores Is Not Expressed in Most American Maize Varieties, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2276456/ 26. Bisabolol: Discover This Minor Cannabis Terpene - RQS Blog, https://www.royalqueenseeds.com/us/blog-bisabolol-discover-this-lesser-known-cannabis-terpene-n1206 27. Guaiol - Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Guaiol